Transports Canada
Développement

Transport Canada
Development

TP 5958F

Analyse et évaluation du moteur linéaire synchrone homopolaire pour les applications en transport urbain

Rapport sommaire

Préparé pour le
Centre de développement
des transports

Transports Canada

JUILLET 1984

Canada

CA2 ON
UQU 325
84
RO2SZ
c.2

TP 5958F

ANALYSE ET ÉVALUATION DU MOTEUR LINÉAIRE SYNCHRONE HOMOPOLAIRE POUR LES APPLICATIONS EN TRANSPORT URBAIN

RAPPORT SOMMAIRE

Library and Information Centre
Centre de Documentation (CSL)
RECEIVED – REÇU LE
DEC 5 1985
Government Publication Officielle
Transport Canada / Transports Canada

A.R. Eastham
G.E. Dawson
D.L. Atherton
S.B. Dewan
G.R. Slemon
R. Ong
W.J. Ballantyne
L.W. Coathup

Préparé pour le

Centre de développement des transports

par

Canadian Institute of Guided Ground Transport (CCIGT)

Juillet 1984

Le contenu du présent rapport ne reflète que les opinions des auteurs et ne saurait en aucun cas engager les politiques et positions officielles du Centre de développement des transports, Transports Canada.

Also available in English under the title: "Analysis and Assessment of the Homopolar Linear Synchronous Motor for Urban Transit Applications", TP 5958E.

FORMULE DE DOCUMENTATION POUR RAPPORT

1. N° du rapport Transports Canada	2. N° de l'étude — CDT	3. N° de catalogue du destinataire
TP5958F	4603	

4. Titre et sous-titre	5. Date du rapport
ANALYSE ET ÉVALUATION DU MOTEUR LINÉAIRE SYNCHRONE HOMOPOLAIRE POUR LES APPLICATIONS EN TRANSPORT URBAIN	juillet 1984
	6. N° du rapport de l'organisme exécutant: 84-2
7. Auteur(s): A.R. Eastham, G.E. Dawson, D.L. Atherton, S.B. Dewan, G.R. Slemon, R. Ong, W.J. Ballantyne, L.W. Coathup	8. N° de dossier Transports Canada: D 1465-288-2
9. Nom et adresse de l'organisme exécutant: Canadian Institute of Guided Ground Transport (CIGGT), Queen's University, Kingston, Ontario, K7L 3N6	10. N° de dossier — ASC: 10DS.T8200-2-2501
	11. N° de contrat — ASC ou Transports Canada: OSD-82-00047
12. Nom et adresse de l'organisme parrain: Centre de développement des transports (CDT), Complexe Guy-Favreau, 200 ouest, boul. Dorchester, Suite 601, Tour ouest, Montréal, Québec H2Z 1X4	13. Genre de rapport et période visée: Sommaire, juil./82-juin/84
	14. Code de l'organisme parrain
15. Remarques additionnelles: Sommaire de "Analysis and Assessment of the Homopolar Linear Synchronous Motor for Urban Transit Applications," TP5957E (CIGGT Report N° 84-2)	16. Agent de projet — CDT: M. Audette - G. Danis, C.A. Versailles

17. Résumé

Le moteur linéaire synchrone homopolaire (MLSH) est une machine triphasée dont l'induit et la source de courant continu d'excitation sont du même côté de l'entrefer. Les rails en acier et rainurés forment une structure passive. La modulation du champ continu introduite par la géométrie de la voie le long de l'axe longitudinal de la machine se retrouve dans l'onde magnétique progressive prpduite par l'excitation des enroulements d'induit par un courant alternatif triphasé. La vitesse de la machine est commandée par la fréquence du courant d'excitation. Le présent projet avait pour buts d'évaluer ce type de moteur: comme solution de remplacement au moteur linéaire d'induction (MLI) pour le transport urbain et en tant que machine apte à assurer la sustentation, la propulsion et le freinage d'un véhicule de transport urbain. Nous avons effectué des études de conception assistée par ordinateur fondées sur la méthode des éléments finis afin de déterminer la distribution du champ électromagnétique dans le cas du MLSH et d'évaluer les paramètres d'un circuit à 2 réactances équivalent de ce dernier pour en déterminer le comportement. Il a été démontré qu'il est possible de concevoir un MLSH qui réponde aux exigences de rendement imposées aux véhicules de transport urbain et dont la valeur du produit facteur de puissance/rendement soit assez élevée, de 0,90 ou plus dans un cas type. On peut ainsi obtenir un moteur nécessitant un inverseur de faible capacité et possédant un excellent rendement énergétique. Toutefois, le MLSH est bien plus encombrant, de 2 à 3 fois plus lourd et développe une force normale beaucoup plus élevée qu'un MLI de rendement équivalent. Bien qu'il ne soit pas intéressant pour la propulsion des véhicules de transport urbain, le MLSH, grâce à sa force normale élevée, peut être exploité dans le cadre des systèmes intégrés de propulsion et de sustentation. Ce moteur présente donc un certain intérêt pour les véhicules à sustentation magnétique à voie passive.

18. Mots-clés	19. Diffusion
Moteur linéaire synchrone homopolaire; moteurs et commandes pour véhicules de transport urbain; méthode des éléments finis; gestion de l'énergie et rendement; systèmes de propulsion et de sustentation intégrés.	Disponible sur demande au CDT.

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
non classifié	non classifiée	33	-

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP5958F	4603	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
ANALYSE ET ÉVALUATION DU MOTEUR LINÉAIRE SYNCHRONE HOMOPOLAIRE POUR LES APPLICATIONS EN TRANSPORT URBAIN	July 1984
	6. Performing Organization Report No. 84-2

7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
A.R. Eastham, G.E. Dawson, D.L. Atherton, S.B. Dewan, G.R. Slemon, R. Ong, W.J. Ballantyne, L.W. Coathup	D 1465-288-2

9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No.
Canadian Institute of Guided Ground Transport (CIGGT) Queen's University Kingston, Ontario K7L 3N6	10DS.T8200-2-2501
	11. DSS or Transport Canada Contract No. 0SD82-00047

12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) Guy Favreau Complex 200 Dorchester Blvd. West, Suite 601, West Tower Montreal, Quebec H2Z 1X4	Summary, July/82-June/84
	14. Sponsoring Agency Code

15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer
Summary of "Analysis and Assessment of the Homopolar Linear Synchronous Motor for Urban Transit Applications," TP5957E (CIGGT Report No. 84-2)	M. Audette, G. Danis C.A. Versailles

17. Abstract

The homopolar linear synchronous motor (HLSM) is a machine which has the three-phase armature and the dc excitation on the same side of the airgap. The track is a coarsely slotted passive steel structure. The modulation of the dc field, produced by this track saliency, along the length of the machine locks into the travelling magnetic wave produced by three-phase ac excitation of the armature winding. Speed of the machine is controlled by armature excitation frequency. The objectives of this project were to evaluate the HLSM as (i) an alternative to the linear induction motor (LIM) for urban transit, and (ii) a machine capable of providing both suspension and propulsion/braking for transportation vehicles. Computer-aided design studies, using finite element analysis with saturable steel characteristics included, were conducted to determine the electromagnetic field distribution in the HLSM and to evaluate the parameters in a two-reactance equivalent circuit model of the machines for performance computation. It has been shown that the HLSM can be designed to meet the performance specifications for an urban transit vehicle and can operate at a high power factor/efficiency product, typically of 0.9 or higher. This leads to low kVA power-conditioner requirements and to excellent energy efficiency. However, the HLSM is considerably larger, two to three times heavier, and has a much higher normal force than an LIM of equivalent performance. While the HLSM is not attractive as a drive for urban transit vehicles, its high normal force makes it feasible for integrated suspension/propulsion applications. The HLSM is therefore of interest for passive guideway Maglev vehicles.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Homopolar linear synchronous motor; Urban transit drives and control; Finite element analysis; Energy management and drive efficiency; integrated suspension/propulsion system	Available from TDC.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
unclassified	unclassified	33	-

TDC/CDT 79-005

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 1

2. CONFIGURATION DU MOTEUR LINÉAIRE SYNCHRONE HOMOPOLAIRE 3

3. CARACTÉRISTIQUES THÉORIQUES 5

4. MODÉLISATION DU MOTEUR LINÉAIRE SYNCHRONE HOMOPOLAIRE 6
   4.1 Circuit équivalent 6
   4.2 Distribution du champ 7
      4.2.1 Champ inducteur 7
      4.2.2 Réactances selon l'axe direct et l'axe normal 11

5. ÉTUDES DE CONCEPTION, PERFORMANCES ET RÉGLAGE DE LA VITESSE 14
   5.1 Moteur pour véhicules de transport urbain 14
   5.2 Comparaison avec le moteur linéaire d'induction 15
   5.3 Systèmes intégrés de sustentation et de propulsion 18

6. CONCLUSION 20

BIBLIOGRAPHIE 22

Annexe A Configuration du moteur linéaire synchrone homopolaire pour la propulsion d'un véhicule de transport urbain 24

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Caractéristiques du moteur linéaire synchrone homopolaire	5
Tableau 2	Comparaison des caractéristiques du moteur linéaire synchrone homopolaire et du moteur linéaire d'induction	17

LISTE DES FIGURES

Figure 1a	Configuration du moteur linéaire synchrone homopolaire à rails décalés et enroulements d'induits en losange	4
Figure 1b	Véhicule utilisant des moteurs linéaires synchrones homopolaires pour son système intégré de sustentation et de propulsion	4
Figure 2	Circuit à deux réactances équivalent du moteur linéaire synchrone homopolaire	6
Figure 3	Représentation par des éléments discrets de la distribution du champ inducteur dans un moteur linéaire synchrone homopolaire dans: a) une demi-section transversale;	8
	b) une section longitudinale dont la longueur est égale à une longueur d'onde	8
Figure 4	Caractéristiques en circuit ouvert de la machine expérimentale de l'Université de Toronto pour un entrefer de 10 mm; résultats des essais, valeur calculée par la méthode des éléments finis et analyse basée sur la composante fondamentale de la fonction de perméance de l'entrefer	10
Figure 5	Distribution du flux correspondant à la fmm induite selon l'axe direct et l'axe normal pour le modèle de moteur linéaire synchrone homopolaire à pôles décalés: a) représentation de la distribution du flux montrant la composante diagonale de ce dernier pour la fmm selon l'axe direct seulement;	12
	b) représentation discrète de la distribution du flux sur une longueur de la machine égale à un pas polaire	12
Figure 6	Courant d'induit, puissance et valeur de $\eta \cos\phi$ en fonction de la vitesse pour une force propulsive maximale dans le cas du moteur linéaire synchrone homopolaire décrit à l'annexe A	15
Figure 7	Commande de la force développée par le moteur linéaire synchrone homopolaire: a) l'algorithme vitesse/angle de commande	16
	b) schéma d'un mécanisme de commande envisagé	16

1. INTRODUCTION

Les moteurs électriques linéaires fournissent aux véhicules guidés un moyen de propulsion et de freinage fiable. Ces moteurs sont essentiels aux véhicules à sustentation magnétique et aux véhicules à coussins d'air; leur utilisation est souhaitable dans le cas des véhicules sur roues lorsque l'état de la voie est tel que l'adhérence roues-rails ne peut être garantie. L'utilisation du moteur linéaire d'induction a été envisagée pour de nombreux véhicules; ce type de moteur a trouvé sa principale application dans les réseaux de transport urbain à faible vitesse comme le People Mover à sustentation magnétique de Birmingham et le réseau de transport à capacité intermédiaire de la Urban Transportation Development Corporation (UTDC)[1].

L'inconvénient principal du moteur linéaire d'induction, on le sait, réside dans la faible valeur du produit facteur de puissance/rendement. Ainsi, dans le cas du moteur linéaire à induction utilisé par l'UTDC, la valeur de $\eta \cos\phi$ est comprise entre 0,40 et 0,42. Cette faible valeur exige un inverseur de forte capacité - il faut un appareil de 325 kVA pour un moteur linéaire d'induction dont la puissance nominale est de 120 kW. Cet inconvénient du moteur linéaire d'induction a incité les chercheurs à étudier les analogues linéaires du moteur synchrone qui permettent d'obtenir, par le pilotage du courant d'excitation, un facteur de puissance élevé. En Allemagne de l'Ouest, on utilise des moteurs linéaires synchrones hétéropolaires à noyau en fer à la fois pour le réseau à faible vitesse M-BAHN[2] et le réseau à grande vitesse TRANSRAPID[3]. Un moteur linéaire synchrone hétéropolaire à noyau à air a été mis au point pour le véhicule à sustentation magnétique à grande vitesse des chemins de fer japonais[4] et on projette également d'utiliser ce moteur pour un véhicule à sustentation magnétique au Canada[5].

Ces moteurs hétéropolaires nécessitent l'intégration à la voie de stators auxquels des courants triphasés de fréquence et d'amplitude variables sont appliqués en vue de commander la vitesse et la force propulsive des véhicules. Le moteur linéaire synchrone homopolaire vise à remplacer ces enroulements statoriques par une voie passive à rails saillants. À la demande du Centre de développement des transports, Transports Canada, nous avons entrepris des études détaillées de conception assistée par ordinateur, au moyen de la méthode des éléments finis et en supposant des caractéristiques de magnétisation non linéaires, en vue

d'évaluer le potentiel du moteur linéaire synchrone homopolaire.

Dans notre étude de ce type de moteur, nous avons observé que la force normale qui s'exerce entre le composant embarqué et la voie passive est substantielle et que, dans les cas types, elle est d'environ 6 à 10 fois supérieure à la force propulsive.

On pourrait donc envisager, comme l'a déjà proposé Boldea[6], d'utiliser cette machine pour un système intégré de sustentation et de propulsion. Nous nous sommes basés sur ces études théoriques pour évaluer le potentiel du moteur linéaire synchrone homopolaire pour le transport urbain et les systèmes intégrés de sustentation et de propulsion.

2. CONFIGURATION DU MOTEUR LINÉAIRE SYNCHRONE HOMOPOLAIRE

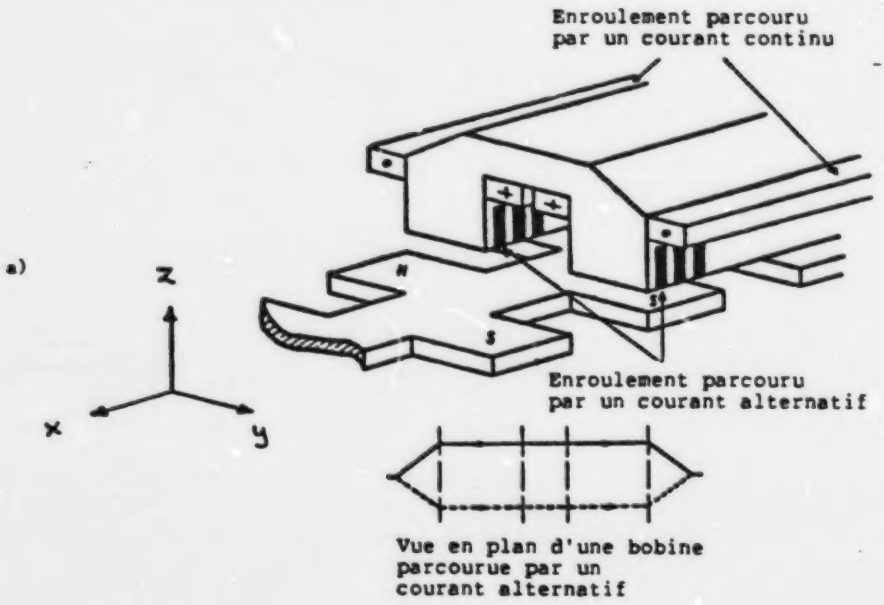
Ce moteur peut se présenter selon l'une des deux configurations ci-dessous[7]:

- rails à pôles décalés, avec enroulements d'induit en forme de losange;
- rails à entretoises, avec enroulements d'induit en huit.

La première configuration, représentée à la figure 1a), a été choisie pour le transport urbain et pour les systèmes intégrés de sustentation et de propulsion pour les deux raisons suivantes:

- la structure ferromagnétique saillante peut être préfabriquée en sections avec les tolérances voulues et être montée plus facilement sur la structure de la voie de guidage;
- les enroulements d'induit étant de conception classique en diamant, la largeur de l'espace central qui sépare les deux côtés actifs du moteur peut être choisie en fonction des caractéristiques du champ plutôt que de limitations imposées par la géométrie des besoins.

Dans le cas des véhicules sur roues, le rail central propre au moteur linéaire d'induction est remplacé par un rail à pôles décalés. Dans le cas des systèmes intégrés de sustentation et de propulsion, deux "rails" à pôles décalés sont montés sous la voie de guidage, comme on peut le voir à la figure 1b).



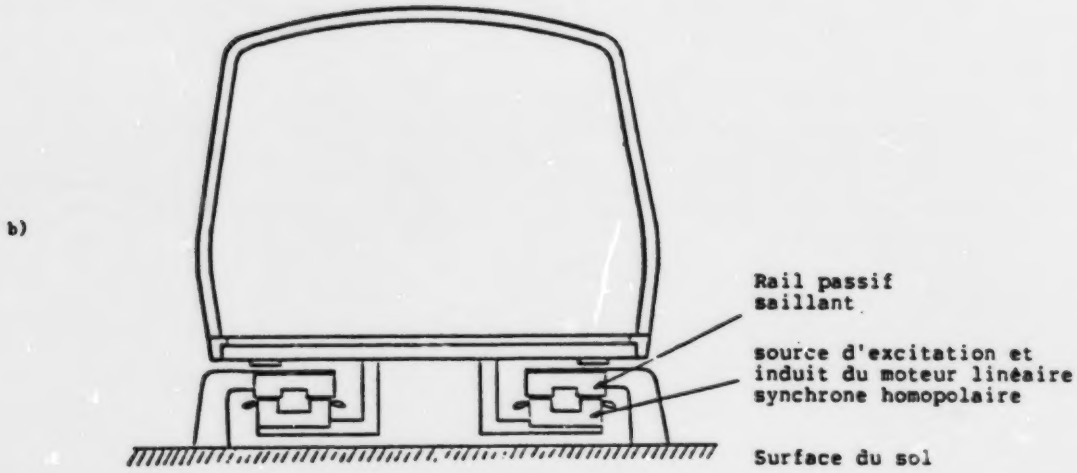


Figure 1a) Configuration du moteur linéaire synchrone homopolaire à rails décalés et enroulements d'induits en losange

Figure 1b) Véhicule utilisant des moteurs linéaires synchrones homopolaires pour son système intégré de sustentation et de propulsion

3. CARACTÉRISTIQUES THÉORIQUES

Les études de conception du moteur linéaire synchrone homopolaire ont été effectuées pour un véhicule de transport type dont les rames peuvent comporter de quatre à six voitures selon la capacité de transport souhaitée. Le tableau 1 présente un ensemble cohérent de caractéristiques applicables, d'une part, au cas des systèmes de propulsion seulement et, d'autre part, au cas des systèmes intégrés de propulsion et de sustentation. Les densités de courant admissibles ont été choisies à la suite d'une analyse thermique et en fonction de l'expérience acquise avec le moteur linéaire d'induction du réseau de transport à capacité intermédiaire de l'UTDC[1].

Tableau 1

Caractéristiques du moteur linéaire synchrone homopolaire

Capacité du véhicule	75 passagers
Masse (en charge, sans les moteurs)	18 300 kg
Vitesse de croisière	22 m/s
Nombre de moteurs par voiture:	
pour la propulsion seulement	2
pour la sustentation et la propulsion intégrées	4
Force maximale disponible par voiture:	
en propulsion	26 kN
en freinage	28 kN
Tension d'alimentation	600 V c.c.
Entrefer nominal	12 mm
Densités de courant:	
bobine d'excitation	4 A/mm^2
enroulements d'induit:	
- lorsque la force est maximum	7,5 A/mm^2
- valeur efficace sur le cycle d'utilisation	5,0 A/mm^2

4. MODÉLISATION DU MOTEUR LINÉAIRE SYNCHRONE HOMOPOLAIRE

4.1 Circuit équivalent

Les performances du moteur linéaire synchrone homopolaire ont été déterminées à partir d'un modèle de ce dernier constitué d'un circuit classique équivalent à pôles saillants et deux réactances (figure 2). La résistance de l'induit a été calculée à partir de la géométrie de ses enroulements. La réactance de fuite de l'induit a été déterminée par l'addition des composantes pour une machine classique (fuites d'encoches, fuites de dentures, fuites d'extrémités d'enroulement et fuites harmoniques) et d'une composante additionnelle attribuable à la portion transversale centrale des enroulements d'induit. La valeur de cette dernière composante a été calculée à partir de la tension induite par unité de largeur d'une section non ferreuse des enroulements d'induit. Les réactances de l'induit selon l'axe direct et l'axe normal ainsi que la tension induite ont été calculées à partir de la distribution du champ déterminée par la méthode des éléments finis décrite ci-dessous.

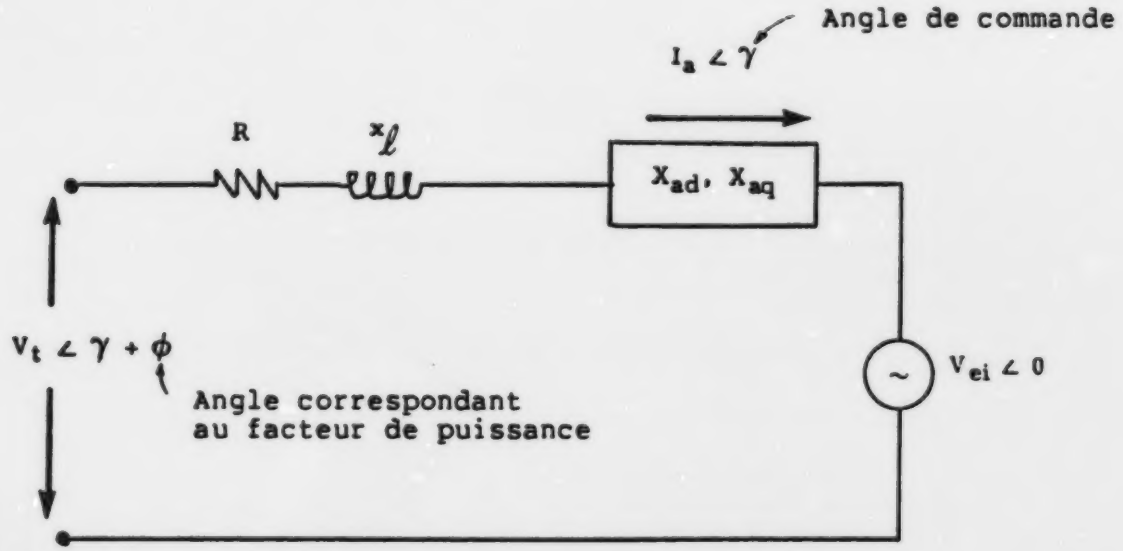


Figure 2 Circuit à deux réactances équivalent du moteur linéaire synchrone homopolaire

4.2 Distribution du champ

On sait que, dans le moteur linéaire synchrone homopolaire à pôles décalés, les champs inducteur et induit possèdent d'autres composantes non nulles que la composante longitudinale et la composante transversale. En vue d'évaluer avec un bon degré de précision la distribution tridimensionnelle du champ dans diverses sections de la machine, nous avons utilisé un modèle magnétostatique bidimensionnel fini. Ce dernier tient compte de la non-linéalité des caractéristiques de magnétisation de la bobine et du rail (fonte) et de la structure laminaire de l'induit (acier au silicium).

4.2.1 Champ inducteur

La tension V_{ei} est égale à la composante fondamentale de la tension induite dans les enroulements par la modulation du champ inducteur introduite par la géométrie de la voie. L'effet de cette modulation a été évalué en considérant tout d'abord une demi-section transversale du moteur linéaire synchrone homopolaire, comme on peut le voir à la figure 3a). Pour déterminer le flux total du champ inducteur par longueur d'onde de l'induit, on a supposé que l'entrefer de la figure 3a) avait pour valeur:

$$g_{efficace} = G * C * g \qquad (4.2)*$$

où g désigne la valeur minimum de l'entrefer;

C désigne le coefficient de Carter, qui représente l'augmentation de la valeur de l'entrefer attribuable aux encoches de l'induit;

G désigne le coefficient de Green, qui représente l'augmentation de la valeur de l'entrefer attribuable à la géométrie du rail.

L'applicabilité des formules de Carter et de Green à la géométrie du moteur linéaire synchrone homopolaire a été vérifiée par la méthode des éléments finis. Dans les deux cas, la valeur théorique et la valeur calculée par la méthode des éléments finis ne s'écartent par de plus de 5 p. 100.

On a ensuite étudié, figure 3b), une section longitudinale de la machine dont la longueur est égale à une longueur d'onde. Cette section présente une vue de

---

* Voir le rapport principal.

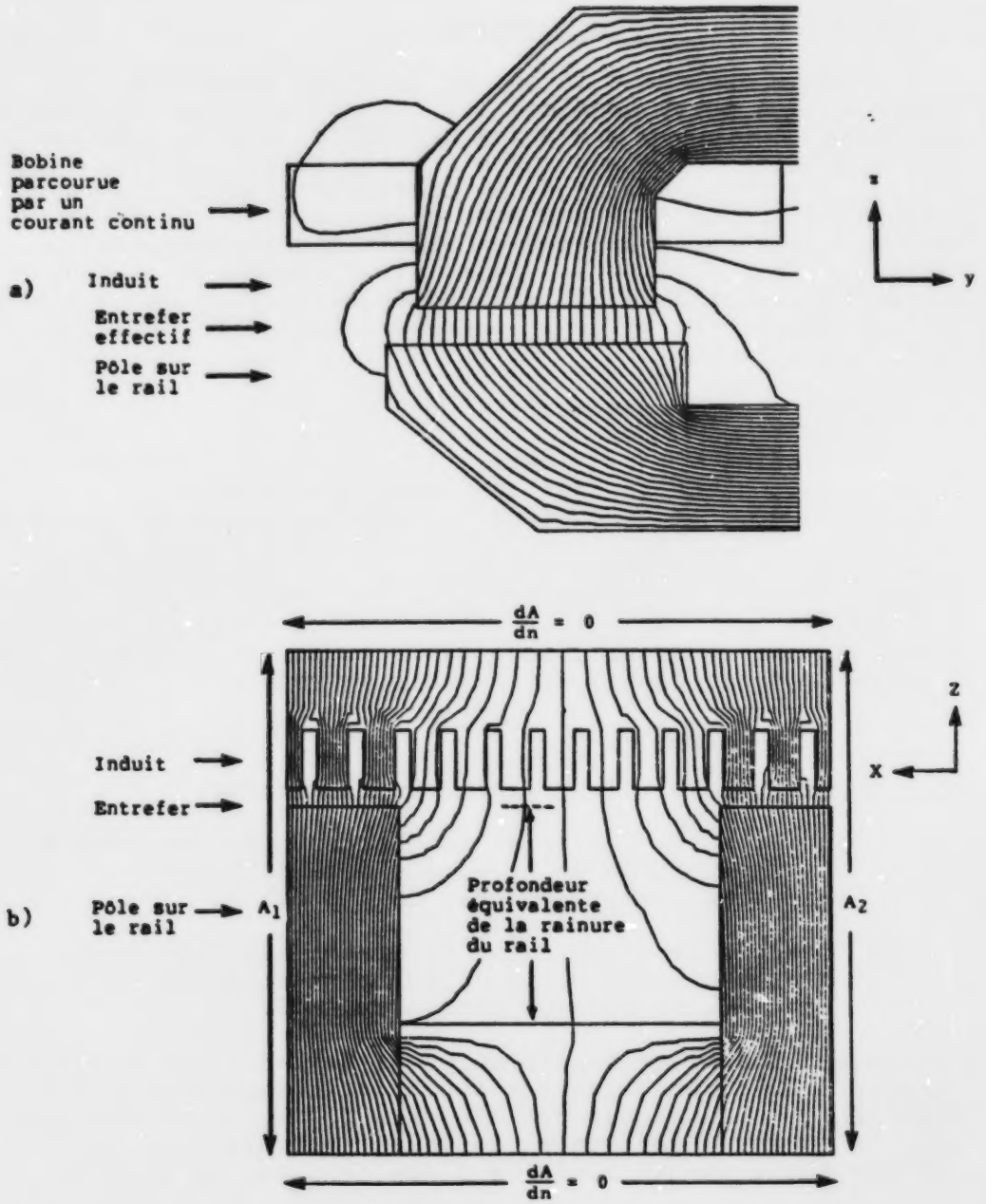


Figure 3 Représentation par des éléments discrets de la distribution du champ inducteur dans un moteur linéaire synchrone homopolaire dans:
a) une demi-section transversale;
b) une section longitudinale dont la longueur est égale à une longueur d'onde

l'entrefer de l'induit avec ses encoches et du rail avec sa saillie; la profondeur de la région interpolaire a été choisie par la méthode des éléments finis en vue d'obtenir la même réluctance que dans le cas d'un moteur linéaire synchrone homopolaire réel. Les conditions aux limites auxquelles doit satisfaire le potentiel vectoriel à travers cette section longitudinale ont été fixées de façon que le flux total par longueur d'onde soit égal au flux total traversant une section transversale. En raison de la géométrie de la voie, ce flux est ensuite distribué et produit une modulation du champ dans l'entrefer.

À partir de la distribution transversale du champ dans les régions polaires et interpolaires et de sa distribution longitudinale, il est possible de déterminer le flux total en un point quelconque des enroulements d'induit en fonction de sa position. La tension induite est alors:

$$V_{ei} = 2\sqrt{2}\pi f \, N k_w \phi_{1max} \qquad (4.1)$$

où f désigne la fréquence du courant d'alimentation;

N désigne le nombre de spires par phase;

k_w désigne le facteur d'enroulement;

ϕ_{1max} désigne l'intensité du flux fondamental par pôle.

La validité de la méthode des éléments finis pour déterminer la tension induite a été établie par comparaison avec des données obtenues par Slemon[8] avec un moteur linéaire synchrone homopolaire à trois pôles. On trouvera représentées à la figure 4 les caractéristiques du circuit établies d'une part par les méthodes de l'analyse numérique et d'autre part obtenues grâce aux résultats des essais.

Les écarts constatés dans la région de saturation sont vraisemblablement attribuables à une incertitude sur les caractéristiques magnétiques des aciers utilisés pour la construction de la machine qui a servi aux essais. Au-dessous du seuil de saturation, la valeur théorique et la valeur mesurée sont approximativement égales, ce qui indique l'utilité de la méthode des éléments finis pour l'analyse et la conception des moteurs linéaires synchrones homopolaires.

À des fins de comparaison, les caractéristiques (en circuit ouvert) déterminées à partir de l'équation (2), mais au moyen de la composante fondamentale du flux en admettant une fonction de perméance idéale[9], sont également représentées à la figure 4. On doit manifestement, dans l'évaluation des possibilités du moteur linéaire synchrone

homopolaire, tenir compte de la forme et de la réluctance du circuit magnétique.

Lorsque l'on connaît la distribution du champ inducteur, il est possible d'évaluer la force normale d'après la formule:

$$F_z = \int \frac{B_z^2}{2\mu_o} \, dA \qquad \text{l'intégration étant effectuée sur la surface de l'induit} \qquad (9.1)$$

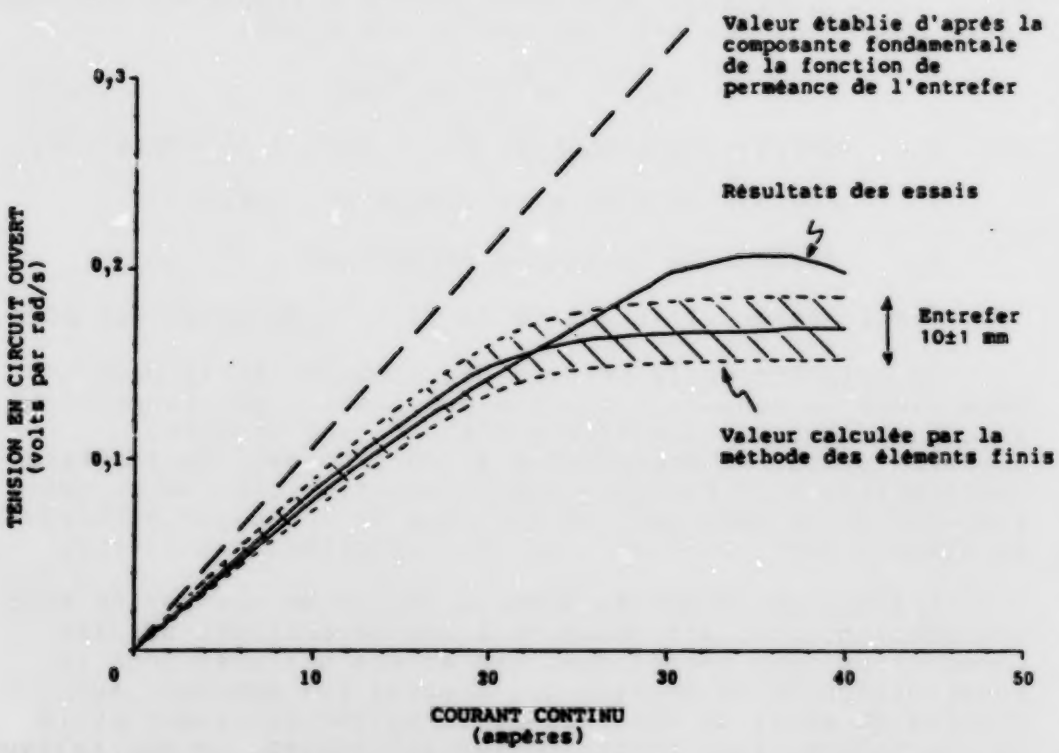


Figure 4 Caractéristiques en circuit ouvert de la machine expérimentale de l'Université de Toronto[8] pour un entrefer de 10 mm; résultats des essais, valeur calculée par la méthode des éléments finis et analyse basée sur la composante fondamentale de la fonction de perméance de l'entrefer[9]

4.2.2 Réactances selon l'axe direct et l'axe normal

Dans le cas d'un moteur linéaire synchrone homopolaire, lorsqu'on étudie la répartition du flux induit, on constate que ce dernier, en plus d'une composante longitudinale, possède également une composante selon la diagonale de la bobine. Cet ensemble de lignes de flux, qui ne peut être représenté par la section de la figure 3a), a été modélisé selon une méthode inspirée de celle de Baudon[10]. La figure 5 présente une vue bidimensionnelle de la bobine coupée selon l'axe longitudinal, puis repliée.

On peut y voir les lignes de flux types de la force magnétomotrice (fmm) induite selon l'axe direct et l'axe normal. Selon l'axe normal, les lignes de flux sont très resserrées dans les régions polaires et plus espacées dans les régions interpolaires. La composante du champ qui traverse la bobine et la voie est nulle. Toutefois, il est intéressant, du point de vue du rendement énergétique, que le flux induit selon l'axe direct possède une composante non nulle assez importante dans la direction diagonale à la bobine et à la voie. Ce flux traverse deux petits entrefers, plutôt qu'un petit et un grand, dans le cas de la direction longitudinale.

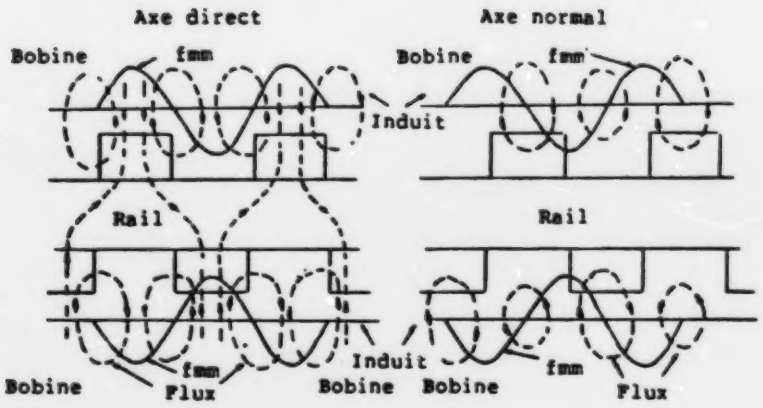
Pour pouvoir appliquer la méthode des éléments finis, une longueur de la machine égale à une longueur d'onde a été décomposée en éléments discrets et les résultats pour l'axe direct et l'axe normal sont également représentés à la figure 5. La condition aux limites qui impose l'annulation de la composante normale du flux (en raison de la symétrie du champ) a été réalisée par le choix de deux minces régions frontières de très faible perméabilité relative (0,0001). Ces régions jouent en quelque sorte le rôle d'isolateur magnétique. Le trajet de retour de la composante diagonale du flux passe par les régions externes, dont la perméabilité relative est très élevée (900 000), ce qui permet de simuler un "court-circuit" magnétique.

Une fois déterminée la distribution du champ induit, les inductances selon l'axe direct et l'axe normal peuvent être calculées à partir des composantes fondamentales du champ magnétique induit au voisinage d'un pôle:

$$L_{d,q} = 2\phi_{d,q} N k_w / I_a \qquad (4.5)$$

Contrairement à ce que prévoit l'expression analytique de la distribution d'un champ induit parfait, obtenue grâce à l'analyse harmonique, résultat souvent cité dans la documentation (par exemple[9]), la méthode des éléments finis conduit à $x_{aq} > x_{ad}$ dans le cas du moteur linéaire synchrone

a)



b)

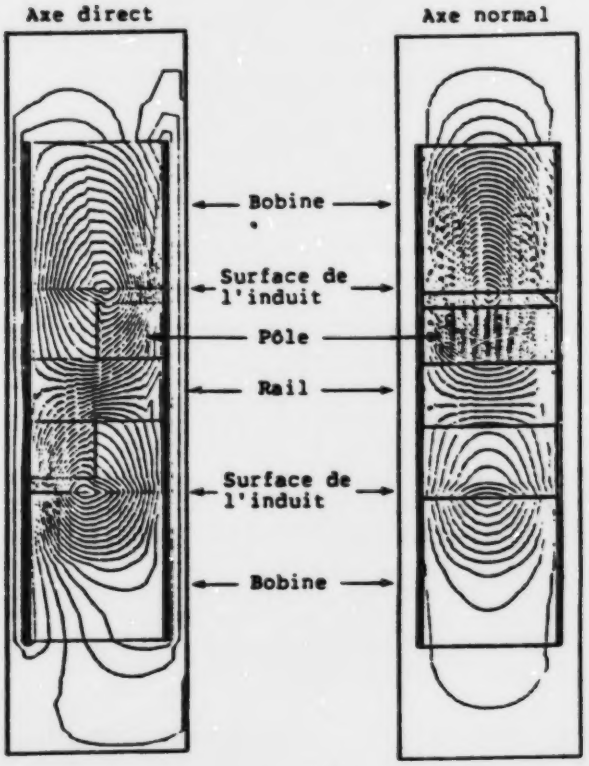


Figure 5 Distribution du flux correspondant à la fmm induite selon l'axe direct et l'axe normal pour le modèle de moteur linéaire synchrone homopolaire à pôles décalés:

a) représentation de la distribution du flux montrant la composante diagonale de ce dernier pour la fmm selon l'axe direct seulement;

b) représentation discrète de la distribution du flux sur une longueur de la machine égale à un pas polaire

homopolaire, résultat qui a été constaté expérimentalement par Balchin et Eastham[1]. On croit que ce résultat est attribuable à la configuration saillante du moteur homopolaire -- chaque côté de ce dernier possédant un pôle par longueur d'onde plutôt que par pas polaire comme dans le cas d'un moteur synchrone à réluctance classique. Une incertitude restait au sujet de l'évaluation de x_{ad} et x_{aq}. Cependant, une analyse de sensibilité a démontré que le moteur homopolaire est capable de rencontrer les spécifications de performance même avec des changements appréciables de ces paramètres.

5. ÉTUDES DE CONCEPTION, PERFORMANCES ET RÉGLAGE DE LA VITESSE

Plusieurs études de conception ont été effectuées en vue de déterminer les machines qui répondent le mieux aux exigences exprimées dans le tableau 1, à la fois pour la propulsion seulement, et pour la propulsion et la sustentation intégrées. On a utilisé, pour la conception des circuits magnétiques et pour l'évaluation de v_{ei}, x_{ad} et x_{aq} la méthode des éléments finis. Le comportement mécanique et les caractéristiques définitives de la machine ont ensuite été déterminés selon la méthode classique à partir du circuit équivalent.

5.1 Moteur pour véhicules de transport urbain

La configuration de la machine qui semble le mieux adaptée pour motoriser les véhicules de transport urbain est décrite à l'annexe A. En vue d'obtenir pour le produit $\eta \cos \phi$ une valeur élevée, on a choisi une machine à champ inducteur de forte intensité et champ induit de faible intensité, les dents et les encoches ayant un rapport de largeur de 2. La figure 6 présente un certain nombre de caractéristiques de rendement; afin d'abréger, seules les caractéristiques en propulsion pour une force propulsive maximale sont indiquées. Le courant d'induit, la puissance et le produit $\eta \cos \phi$ sont représentés en fonction de la vitesse pour un champ de 24 kA. En freinage, la valeur maximum du courant d'induit atteint 265 A et la puissance 185 kVA.

La vitesse est commandée au moyen d'un inverseur à tension et fréquence variables. Une source de tension à transistors de puissance ou à gain de courant à l'ouverture semble être la mieux adaptée à cette fin; cette source doit être réglée de façon que le courant soit presque sinusoïdal, particulièrement à basse vitesse, en vue de minimiser les harmoniques.

Dans le but de réduire les pertes thermiques dans l'induit et d'économiser l'énergie fournie par les rails d'alimentation (600 V c.c.), le circuit de commande de la vitesse doit être en mesure de faire parcourir au véhicule une distance donnée à une vitesse donnée et ce pour un courant d'induit minimum.

Ce résultat peut être obtenu en réglant l'angle de la fmm induite par rapport à l'axe normal du moteur, angle détecté par des capteurs de proximité ou des dispositifs de

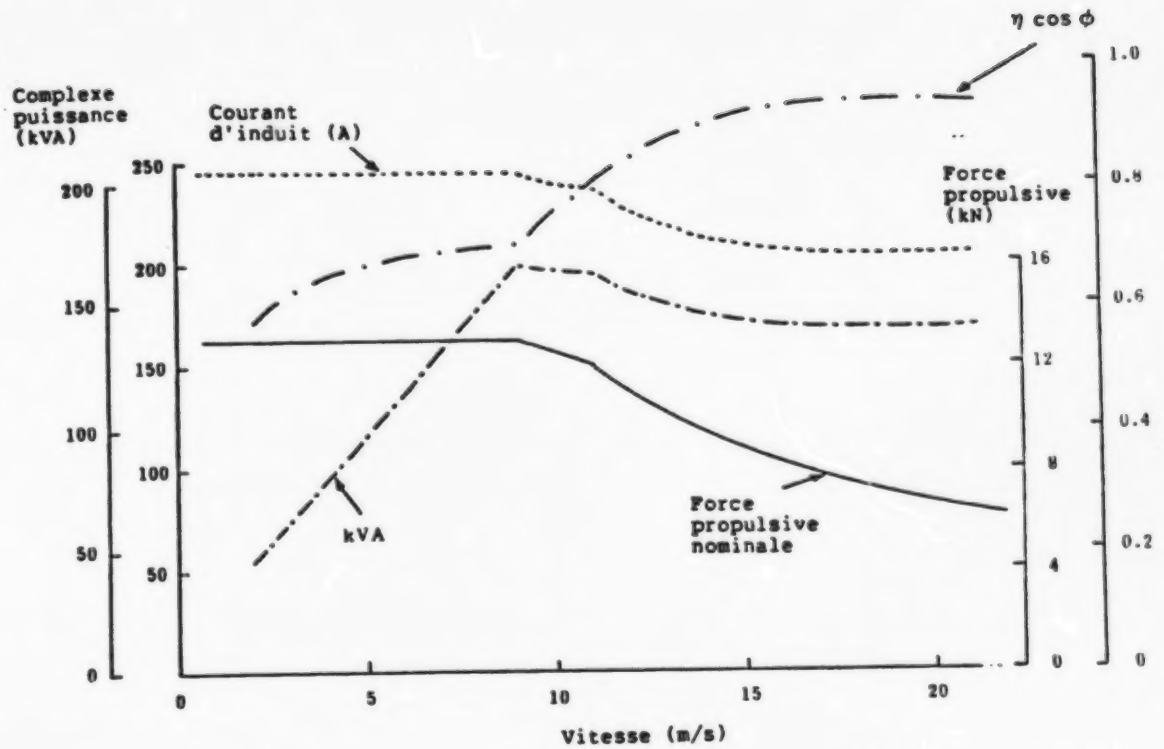


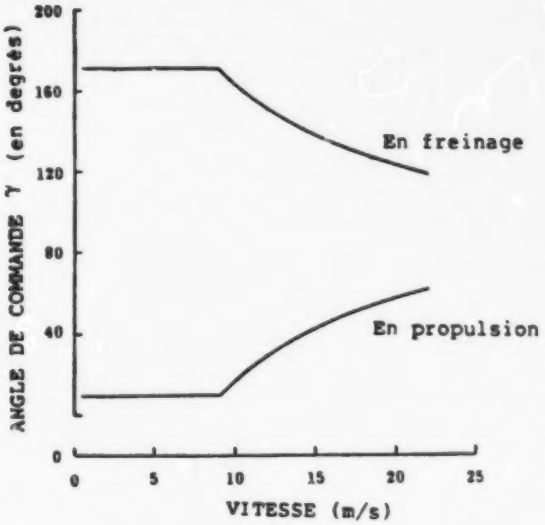
Figure 6 Courant d'induit, puissance et valeur de $\eta \cos \phi$ en fonction de la vitesse pour une force propulsive maximale dans le cas du moteur linéaire synchrone homopolaire décrit à l'annexe A

mesure de la réluctance pôle-rail. Il est possible de déterminer, à partir de calculs fondés sur les paramètres du circuit équivalent au moteur linéaire synchrone homopolaire (figure 7a), les relations optimales qui doivent lier l'angle en question, en freinage et en propulsion, à la vitesse et d'obtenir ainsi un algorithme de commande approprié. La figure 7b) représente le schéma simplifié d'un mécanisme de commande envisagé pour un moteur linéaire synchrone homopolaire servant au transport urbain.

5.2 Comparaison avec le moteur linéaire d'induction

On trouvera à l'annexe A une comparaison détaillée des caractéristiques du moteur linéaire synchrone homopolaire et d'un moteur linéaire d'induction de performances semblables (il s'agit du moteur linéaire d'induction utilisé pour le réseau de transport à capacité intermédiaire de l'UTDC'.

a)



b)

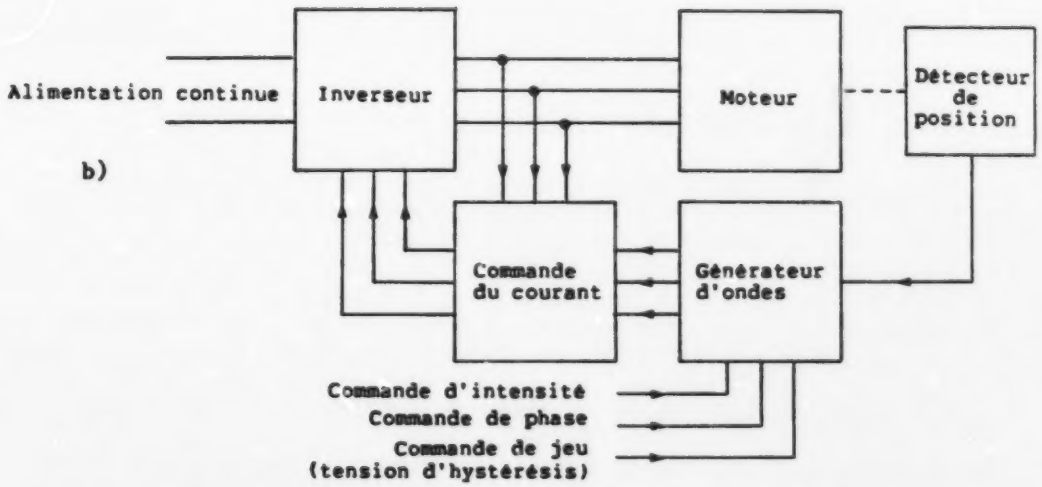


Figure 7 Commande de la force développée par le moteur linéaire synchrone homopolaire:
a) l'algorithme vitesse/angle de commande
b) schéma d'un mécanisme de commande envisagé

Le tableau 2 présente une comparaison des caractéristiques générales des deux machines. Il est manifeste que le moteur linéaire synchrone homopolaire est plus encombrant, plus lourd; qu'il nécessite une voie de guidage de plus grande profondeur et développe une force normale beaucoup plus considérable que le moteur linéaire d'induction. Il fonctionne toutefois avec un produit facteur de puissance x rendement beaucoup plus élevé, et nécessite par conséquent un inverseur de faible capacité.

Tableau 2
Comparaison des caractéristiques du moteur linéaire synchrone homopolaire et du moteur linéaire d'induction

	MLSH	MLI
Dimensions	Longueur: 2,35 m Largeur: 0,65 m Hauteur: 0,18 m	Longueur: 1,90 m Largeur: 0,52 m Hauteur: 0,10 m
Masse des composants électromagnétiques du moteur	1410 kg	422 kg
Profondeur de la voie de guidage	8 cm	3 cm
Force normale maximale	90 kN	25 kN
Facteur de puissance x rendement (au-dessus de 15 m/s)	typiquement 0,8*	typiquement 0,4*
Capacité de l'inverseur	200 kVA	325 kVA
Énergie consommée par une rame de quatre voitures par kilomètre parcouru	5,4 kWh/km**	9,6 kWh/km**
Consommation maximale pour une rame de quatre voitures	1 260 kW	1 580 kW

* en incluant les pertes dans les bobines du champ.
** En admettant qu'il n'y a pas de pertes dans la ligne d'alimentation.

La dernière caractéristique a été évaluée quantitativement au moyen d'un modèle permettant de simuler le fonctionnement d'un véhicule de transport sur un corridor de longueur donnée en vue d'en évaluer le comportement mécanique et électrique. On a simulé le fonctionnement de véhicules motorisés respectivement par un moteur linéaire synchrone homopolaire et un moteur linéaire d'induction sur un corridor de 21 km de longueur comportant 15 stations non uniformément espacées avec un temps d'arrêt de 20 secondes à chaque station. Ce corridor comportait des pentes dont l'inclinaison maximum était de 6 p. 100. On a également tenu compte de la différence de masse (une tonne) entre les deux types de moteur.

On a admis, pour l'expérience, une accélération maximum de 1,27 m/s^2 et une décélération de 1,00 m/s^2. L'énergie correspondante consommée pour une ligne d'alimentation continue de 600 V c.c. (en tenant compte du rendement des convertisseurs) par kilomètre parcouru, ainsi que la consommation maximale pour une rame type à quatre voitures sont données par le tableau 2.

Malgré ces avantages en matière de consommation d'énergie, le moteur linéaire synchrone homopolaire, à cause de ses dimensions, de sa masse et de la force normale qu'il développe, poserait de sérieux problèmes pour les applications au transport urbain. L'addition d'environ une tonne de masse non suspendue par essieu aurait des incidences majeures sur la dynamique des voitures. Cet inconvénient, combiné à la valeur élevée de la force normale développée, imposerait des exigences inacceptables à la voie et au véhicule lui-même. En conclusion, le moteur linéaire synchrone homopolaire, en tant que moyen de propulsion seulement, n'est pas rentable pour les applications au transport urbain.

5.3 Systèmes intégrés de sustentation et de propulsion

Le moteur linéaire synchrone homopolaire, mis au point dans le cadre des études théoriques que l'on vient de mentionner, développe une force propulsive de 13 kN et une force normale de 93 kN, ce qui correspond à un rapport force de sustentation/force de propulsion de 7,1. En mode de sustentation électromagnétique guidée, voir la figure 1b), ce moteur aurait un rapport force de sustentation/poids de 6,7 et permettrait le transport d'une charge utile de 8000 kg ainsi que des accélérations pouvant aller jusqu'à 0,14 g (1,42 m/s^2). On peut donc envisager, comme l'a déjà

proposé Boldea[6], d'utiliser le moteur linéaire synchrone homopolaire pour un système intégré de sustentation et de propulsion.

Les expériences de simulation menées avec la version uniquement propulsive du moteur linéaire synchrone homopolaire dans un couloir de transport type ont démontré qu'il faut, pour obtenir un rendement optimal, exploiter la machine à une valeur voisine de la valeur maximale du champ inducteur. Même en croisière, alors que la force propulsive nécessaire est peu élevée, il s'est avéré souhaitable de ne pas réduire l'intensité du champ inducteur de plus de 20 p. 100. En mode de sustentation et de propulsion intégrées, il serait nécessaire de maintenir constante l'intensité du champ et d'assurer le pilotage dynamique du courant d'excitation en fonction des variations de l'entrefer. Les évaluations effectuées au moyen du circuit équivalent ont démontré que ce mode de fonctionnement modifie très peu les caractéristiques électriques du moteur linéaire synchrone homopolaire du point de vue du réglage de la force propulsive.

Il devient par conséquent apparent qu'il est possible, dans le cas de ce type de moteur, de régler indépendamment la force normale et la force propulsive. En modulant le champ inducteur au moyen des données fournies par des accéléromètres et des dispositifs de mesure de l'entrefer, on peut obtenir une force de sustentation électromagnétique stable.

Pour obtenir des caractéristiques électriques optimales, il est possible de définir une famille de courbes qui expriment l'angle de commande en fonction de la vitesse (comme celles de la figure 7a); il suffit alors, pour régler la force propulsive, de modifier l'intensité du courant induit en fonction de l'angle de commande γ qui dépend lui-même de la vitesse.

En pratique, pour un véhicule de transport urbain, les deux moteurs linéaires synchrones homopolaires à onze pôles et montage central seraient remplacés, dans le cas d'un système intégré de sustentation et de propulsion, par quatre moteurs à six pôles montés à chacun des angles de la voiture. La plupart des caractéristiques théoriques de ces moteurs seraient celles données par l'annexe A. Le seul changement significatif consisterait à faire passer le nombre de conducteurs par encoche de l'induit de 8 à 16 et à réduire de moitié l'intensité du courant d'induit afin d'assurer l'adaptation des impédances de la machine et de la source d'alimentation (jusqu'à 230 V par phase pour une ligne d'alimentation continue de 600 V).

6. CONCLUSION

Les études de conception assistée par ordinateur sur lesquelles porte le présent rapport ont permis de comparer le moteur linéaire synchrone homopolaire au moteur linéaire d'induction pour le transport urbain. Les avantages et les inconvénients essentiels de chaque solution sont évidents. Le moteur linéaire synchrone homopolaire peut être exploité avec une valeur élevée du produit $\eta \cos \phi$, ce qui permet d'utiliser un inverseur de plus faible capacité que dans le cas du moteur linéaire d'induction et, par conséquent, de réaliser des économies sur les coûts d'exploitation puisque la consommation d'énergie par kilomètre et l'énergie maximale consommée sont plus faibles. Toutefois, ce type de moteur est beaucoup plus encombrant et plus lourd. Il nécessite une voie plus profonde et la force normale qu'il développe est supérieure de 3 à 4 fois ce qu'elle est dans le cas d'un moteur linéaire d'induction. Ces facteurs rendent le moteur linéaire synchrone homopolaire non rentable pour le transport urbain.

Toutefois, en raison de la force normale élevée qu'il développe, le moteur linéaire synchrone homopolaire peut être utilisé pour les systèmes intégrés de sustentation et de propulsion. Il devient alors possible, pour des valeurs élevées de $\eta \cos \phi$, de régler la force propulsive et la force de freinage indépendamment de la force de sustentation.

Contrairement aux réseaux TRANSRAPID et M-BAHN, les systèmes intégrés de sustentation et de propulsion équipés d'un moteur linéaire synchrone homopolaire utilisent une voie de guidage passive peu coûteuse; la puissance propulsive doit toutefois être transférée au véhicule. Bien que le moteur linéaire d'induction utilisé pour le système intégré de sustentation et de propulsion du ROMAG (devenu maintenant MAGTRANSIT) utilise également une voie de guidage passive, le moteur linéaire synchrone homopolaire fonctionne à une valeur plus élevée de $\eta \cos \phi$ et nécessite par conséquent un inverseur de capacité et de masse plus faible, ce qui permet de réaliser des économies à l'achat et à l'exploitation.

Il semble que les systèmes intégrés de sustentation et de propulsion constituent l'application la mieux adaptée aux caractéristiques du moteur linéaire synchrone homopolaire. Dans ce mode de fonctionnement, la force développée par ce type de moteur est facile à régler et on obtient un excellent rendement énergétique -- il mérite donc une

évaluation détaillée par comparaison avec d'autres systèmes intégrés de sustentation et de propulsion envisagés pour le transport urbain et interurbain.

BIBLIOGRAPHIE

1. BALLANTYNE, W.J. "LIM Design for Urban Transit", Proc. of International Conference on Maglev Transport - Now and for the Future, Solihull, Angleterre, octobre 1984.

2. BIVENS, J.A. "M-BAHN - Advanced Maglev Technology Reality", Proc. Second International Symposium on Advanced Propulsion and Control for Urban Transit, Baltimore, MD., U.S. Dept. of Transportation, 1984, pp. 223-227.

3. GLATZEL, K., KHURDOCK, G. et ROGG, D. "The Development of the Magnetically Suspended Transportation System in the Federal Republic of Germany", IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1980, Vol. VT-29, pp. 3-16.

4. OHTSUKA, T. et KYOTANI, Y. "Recent Progress in Superconducting Magnetic Levitation Tests in Japan", Proc. IEEE IAS Annual Meeting, 1980, Publ. n° 80CH1575-0 de IEEE, pp. 238-243. Voir également Proceedings of the Second International Seminar on Superconductive Magnetic Levitated Train, Miyazaki, Japon, novembre 1982.

5. HAYES, W.F. et TUCKER, H.G. "Design Concept and Comparative Performance of an Electrodynamic Maglev Transportation System for the Toronto-Montreal Corridor of Canada", Proc. of International Conference on Maglev Transport - Now and for the Future, Solihull, Angleterre, octobre 1984.

6. BOLDEA, I. "MAGNIBUS - The Romanian Linear Inductor (Synchronous) Motor (Passive Guideway) Maglev", Proc. of International Conference on Maglev Transport - Now and for the Future, Solihull, Angleterre, octobre 1984.

7. EASTHAM, J.F. "Iron-Cored Linear Synchronous Machines", Electronics & Power, 1977, Vol. 23, pp. 239-242.

8. SLEMON, G.R., DEWAN, S.B., BURKE, P.E., STRAUGHAN, A. et BHATIA, R. "Study of an Analytical Model of the Homopolar Linear Synchronous Motor", TP 2856E de Transports Canada, décembre 1980.

9. NASAR, S.A. et BOLDEA, I. Linear Motion Electric Machines, John Wiley & Sons, 1976.

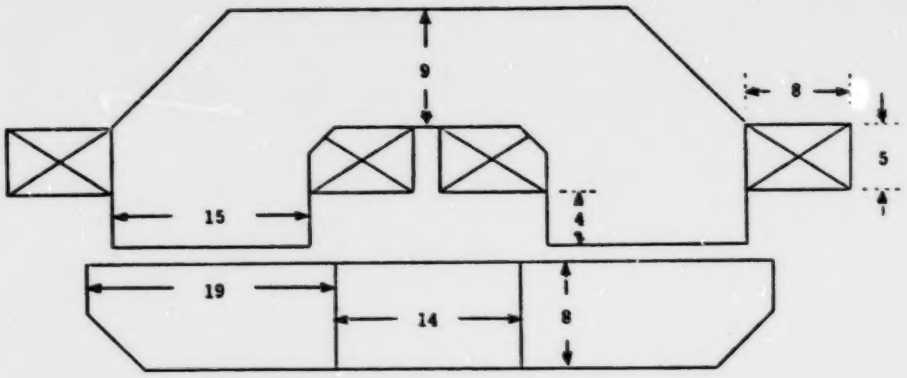
10. BAUDON, Y. "Moteur linéaire synchrone", rapport final, D.G.R.S.T. (n° 76-7-0126), juillet 1979.

11. BALCHIN, M.J. et EASTHAM, J.F. "Characteristics of a Heteropolar Linear Synchronous Machine with Passive Secondary", Electric Power Applications, 1979, Vol. 2, pp. 213-218.

ANNEXE A

Configuration du moteur linéaire synchrone homopolaire pour la propulsion d'un véhicule de transport urbain

i) Section transversale



dimensions en cm

ii) Enroulement inducteur du moteur linéaire synchrone homopolaire

FMM totale:	24-28 kiloampères par spire
Par bobine:	
Nombre de spires:	500
Courant:	24 - 28 A
Section:	50 mm x 80 mm
Facteur de remplissage (en tenant compte des passages de refroidissement:	0,75
Section des conducteurs:	6 mm^2
Résistance:	9,0 ohms
Densité de courant dans les conducteurs:	4 - 4,7 A/mm^2
Tension d'attaque (deux bobines en série):	504 volts
Pertes dans les enroulements:	10,4 - 14,1 kW

iii) Enroulements d'induit (d'un moteur linéaire synchrone homopolaire et d'un moteur linéaire d'induction de performances équivalentes)

	MLSH	MLI
Nombre de phases:	3	3
Nombre de poles:	11	6
Pas polaire:	183,3 mm	286,8 mm
Largeur active de l'induit:	150 mm (pour chaque côté)	216 mm
Nombre d'encoches:	71 (de chaque côté)	79
Nombre d'encoches à moitié remplies:	5 (à chaque extrémité)	7 (à chaque extrémité)
Pas des encoches:	30,6 mm	23,9 mm
Largeur des encoches:	10,2 mm	15,7 mm
Largeur des dents:	20,4 mm	8,2 mm
Profondeur des encoches:	40,0 mm	54,9 mm
Nombre d'encoches/ pôle/phase:	2	4
Nombre de conducteurs par encoche:	8	8
Facteur de remplissage des encoches:	0,69	0,58
Pas des bobines:	5/6	7/12
Porte-à-faux des bobines (de chaque côté):	80 mm	152 mm
Section transversale des conducteurs:	35 mm^2	62,6 mm^2
Nombre de spires par phase:	88	96
Gamme de fréquence:	0-60 Hz	5-50 Hz
Tension maximum disponible par phase:	230 V	270 V
Limite de tension (point de rupture):	10-11 m/s	12-13 m/s
Lorsque la force atteint sa valeur maximum:		
Courant:	250 A	465 A
Densité de courant dans les conducteurs:	7,2 A/mm^2	7,4 A/mm^2

iv) Paramètres du circuit équivalent au moteur linéaire synchrone homopolaire

Par phase, à 60 Hz:		
Résistance d'induit:		0,083 ohm
Réactance de fuite:		
Fuites attribuables aux encoches:	0,261 ohm	
Fuites attribuables à la denture:	0,109 ohm	
Fuites attribuables aux extrémités de l'enroulement:	0,063 ohm	
Fuites harmoniques:	0,036 ohm	
Fuites attribuables à l'entrefer central:	0,079 ohm	0,548 ohm
Axe direct, x(ad):		
. valeur calculée à partir de la formule donnant l'énergie emmagasinée:		0,875 ohm
. par la méthode des éléments finis:		0,622 ohm
Axe normal, x(aq):		
. valeur calculée à partir de la formule donnant la quantité d'énergie emmagasinée:		0,631 ohm
. par la méthode des éléments finis:		1,000 ohm
Tension induite:	composante fondamentale de la dérivée du champ	